

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.046>

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ЗІ СТРИЖНЕВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ У СКЛАДІ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

К.О. Липківський\*, докт. техн. наук, А.Г. Можаровський\*\*, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net), [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

*Автотрансформатор (АТ) трансформаторно-ключової виконавчої структури (ТКВС) стабілізатора напруги змінного струму значною мірою визначає масогабаритні показники перетворювача в цілому. Одним із методів підвищення ефективності використання встановленої потужності АТ є цілеспрямований перерозподіл втрат у елементах АТ, який дає змогу зменшити нерівномірність їхнього нагріву, збільшити густину струму в його обвитці та внаслідок цього збільшити струм навантаження та його припустиму потужність. У роботі прослідковано особливості цієї процедури та її наслідки для ТКВС з автотрансформатором, що має магнітопровід стрижневої конструкції, можливий вибір якої є одним із низки проявів багатоваріантності побудови трансформаторно-ключової виконавчої структури. Бібл. 12, рис. 2, таблиця.*

**Ключові слова:** трансформаторно-ключова виконавча структура, discrete smart transformer, стабілізатор напруги змінного струму, автотрансформатор, секція обвитки, ефективність використання.

Трансформаторно-ключові виконавчі структури – ТКВС [1] (discrete smart transformer [2], intelligent transformer [3], tap changing transformer [4]), що мають широке коло застосування високоефективних перетворювачів напруги змінного струму (voltage regulator circuit) з дискретно разовими системами керування (discrete time control [5]), априорі відзначаються різноплановою багатоваріантністю, зокрема:

– функціонального призначення (регулювання напруги за визначеним законом; стабілізація вихідної напруги на заданому, зокрема номінальному рівні з припустимою похибкою за зміни будь-яких дестабілізуючих факторів; стабілізація зі зміною рівня напруги, що підлягає стабілізації, яку ще називають мультизонна стабілізація [6]);

– потужності масиву коефіцієнтів передачі (кількості станів) перетворювача за напругою, яка визначається можливим діапазоном відхиленої вхідної напруги (стабілізатори) або потрібним діапазоном зміни вихідної напруги (регулятори);

– кроків зміни рівня напруги, тобто коефіцієнта передачі (з однаковим абсолютним значенням кроку – найпростіший варіант; з однаковим відносним значенням кроку зміни, що дає змогу отримати більш точне регулювання на різних рівнях напруги, що регулюється; у окремих випадках, навпаки, з більшим кроком за менших напруг і меншим – за більших, як, наприклад, за амплітудно-імпульсного формування квазісинусоїдальної низькочастотної напруги);

– схемотехнічних рішень (розмаїття структур, конфігурацій кожної окремої структури, зміна яких не веде до принципової зміни структури; розміщення та побудова напівпровідникових та іншого виконання комутаторів, що реалізують необхідну зміну коефіцієнта передачі ТКВС за напругою);

– станів кожної конфігурації (без принципової зміни структури), кожному з яких відповідають певні значення коефіцієнта передачі за напругою та струмового завантаження секції обвитки трансформуючого елемента, що визначає сумарні втрати потужності в ній;

– взаємного розташування секцій обвитки трансформуючого елемента та густини струму в окремих секціях, яка може варіюватися з метою зменшення температурної неоднорідності об'єкта;

– повноти перетворення енергії (співвідношення часток енергії, які передаються до споживача електричним та електромагнітним шляхом), що визначає встановлену потужність трансформуючого елемента (трансформатора, автотрансформатора, вольтододавчого трансформатора або їх сполучення) перетворювача напруги, яка може варіюватися з метою зменшення температурної неоднорідності об'єкта;

– типів та матеріалів магнітопроводу трансформуючого елемента ТКВС перетворювача напруги змінного струму.

У попередніх роботах, зокрема у [7], детально досліджувалися ТКВС стабілізаторів напруги змінного струму з автотрансформаторами на магнітопроводах броньової конструкції. Вбачається доцільним зупинитися також на останньому із зазначених вище аспектів багатоваріантності побудови ТКВС. З огляду на це **метою роботи** є визначення рівня підвищення ефективності використання встановленої потужності автотрансформатора з магнітопроводом стрижньової конструкції в складі трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізатора напруги змінного струму шляхом цілеспрямованого перерозподілу втрат у елементах автотрансформатора.

Дослідимо ту ж саму конфігурацію ТКВС (рис. 1), що й у [8], з 6 напівпровідниковими ключовими елементами (комутація яких дає змогу реалізувати 9 нетотожних коефіцієнтів передачі за напругою), яка призначена для стабілізації вихідної напруги на номінальному рівні  $U_n=220$  В з похибкою  $\delta=\pm 3,0\%$  ( $\delta=(\gamma+1)/(\gamma-1)$ , де коефіцієнт  $\gamma=U_{2max}/U_{2min}=226,6/213,4=1,0618$ ) за можливих відхилень вхідної напруги в межах  $168\div 288$  В ( $U_{1min}^*=U_{1min}/U_n=2/\gamma^4(\gamma+1)=0,764$ ,  $U_{1max}^*=2\gamma^5/(\gamma+1)=1,31$ ) (надалі для компактності оперуватимемо переважно відносними значеннями, нормованими за номінальною напругою  $U_n$ ).

Кожному з коефіцієнтів передачі  $K_j$  ( $j=\overline{1,9}$ ) відповідає  $j$ -й стан структури, у якому працює певна пара ключових елементів (КЕ) зі вхідного (V1, V2, V3) та вихідного (V4, V5, V6) комутаторів. У першому стані ( $j=1$ ), на який припадає зміна вхідної напруги  $U_1^*$  від  $U_{1min}^*$  до  $\gamma U_{1min}^*$ , працюють ключові елементи V1, V4, і коефіцієнт передачі є найбільшим:  $K_1=K_{max}=\gamma^4=1,271$ ; у другому стані ( $j=2$ ) ( $U_1^*=\gamma U_{1min}^* \div \gamma^2 U_{1min}^*$  працюють V1, V5):  $K_2=\gamma^3=1,197$ ; у третьому ( $j=3$ ) ( $U_1^*=\gamma^2 U_{1min}^* \div \gamma^3 U_{1min}^*$  працюють V1, V6):  $K_3=\gamma^2=1,127$ ; у четвертому ( $j=4$ ) ( $U_1^*=\gamma^3 U_{1min}^* \div \gamma^4 U_{1min}^*$  працюють V2, V4):  $K_4=\gamma=1,062$ ; у п'ятому ( $j=5$ ) ( $U_1^*=\gamma^4 U_{1min}^* \div \gamma^5 U_{1min}^*$  працюють V2, V6):  $K_5=1$ ; у шостому ( $j=6$ ) ( $U_1^*=\gamma^5 U_{1min}^* \div \gamma^6 U_{1min}^*$  працюють V2, V6):  $K_6=\gamma^{-1}=0,942$ ; у сьомому ( $j=7$ ) ( $U_1^*=\gamma^6 U_{1min}^* \div \gamma^7 U_{1min}^*$  працюють V3, V4):  $K_7=\gamma^{-2}=0,887$ ; у восьмому ( $j=8$ ) ( $U_1^*=\gamma^7 U_{1min}^* \div \gamma^8 U_{1min}^*$  працюють V3, V5):  $K_8=\gamma^{-3}=0,835$ ; у дев'ятому ( $j=9$ ) ( $U_1^*=\gamma^8 U_{1min}^* \div \gamma^9 U_{1min}^*$  працюють V3, V6):  $K_9=\gamma^{-3}=0,786$ .

Реалізація цього масиву коефіцієнтів передачі шляхом комутації КЕ досягається завдяки тому, що потенціали точок відводів обвитки  $\varphi_i$  відносно О (спільної точки вхідного та вихідного контурів) обрано в даній структурі за законом  $\varphi_i=U_{W_0max} \cdot \gamma^{i-1}$  ( $i=\overline{1,7}$ ), де  $U_{W_0max}$  – максимальне значення напруги на базовій секції  $W_0$  у момент переходу з третього в четвертий стан ( $U_{W_0max}=U_{1min} \cdot \gamma^{-2}$ ). За цих обставин напруги на секціях обвитки, нормовані за номінальним значенням  $U_n$ , дорівнюють відповідно:  $U_{W_0}^*=2/\gamma(\gamma+1)$ ;  $U_{W_1}^*=2(\gamma-1)/\gamma$ ;  $U_{W_2}^*=2\gamma(\gamma-1)/(\gamma+1)$ ;  $U_{W_3}^*=2\gamma^2(\gamma-1)/(\gamma+1)$ ;  $U_{W_4}^*=2\gamma^3(\gamma-1)$ . Величини цих напруг не залежать від навантаження і є функцією лише коефіцієнта  $\gamma$ , який визначається заданим діапазоном зміни вхідної напруги

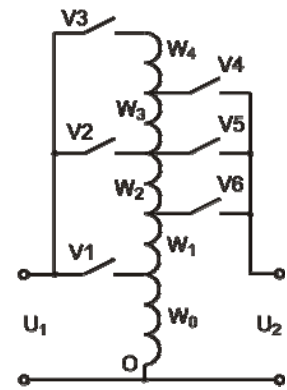


Рис. 1

та припустимою похибкою стабілізації  $\delta$  вихідної напруги. За обраного значення  $U_n=220$  В маємо:  $U_{W_0}=201$  В;  $U_{W_1}=25,63$  В;  $U_{W_2}=14,02$  В;  $U_{W_3}=14,88$  В;  $U_{W_4}=32,58$  В.

Стосовно струмів слід відмітити, що сумарне струмове завантаження секцій обвитки суттєво відрізняється в різних станах. У п'ятому ( $j=5$ ) воно дорівнює нулю, бо через ключі V2 та V5 йде безпосередня передача енергії від мережі до споживача. У першому стані ( $j=1$ ), коли струми в секціях визначаються залежностями  $I_{W_0}^* = I_{W_0}/I_n = 2\gamma(\gamma^4 - 1)/(\gamma + 1)$ ;  $I_{W_1}^* = I_{W_2}^* = I_{W_3}^* = 2\gamma/(\gamma + 1)$ ;  $I_{W_4}^* = 0$  (тут  $I_n$  – номінальне значення вхідного струму, що визначається навантаженням), як свідчить аналіз, воно за будь-якого  $\gamma \in$  максимальним, навіть за відсутності струму в четвертій секції. Саме за цим першим станом відбувається розрахунок АТ згідно з методикою, викладеною в [9]. Дещо меншим сумарне струмове завантаження секцій обвитки відбувається в останньому – дев'ятому стані ( $j=9$ ), коли певне струмове завантаження має також четверта секція  $I_{W_4}^* = I_{W_2}^* = I_{W_3}^* = 2\gamma/(\gamma + 1)\gamma^4$ ;  $I_{W_0}^* = I_{W_1}^* = 2\gamma(1 - \gamma^{-4})/(\gamma + 1)$ , тобто, за будь-яких можливих змін під час розрахунку АТ, наприклад, густини струму в окремих секціях обвитки, це треба брати до уваги.

Маючи отримані залежності напруг та струмів у секціях автотрансформатора, можна перейти безпосередньо до його розрахунку. На відміну від [8] обираємо згідно зі сформульованою метою магнітопровід стрижньової конструкції ПЛ32×64-100, який у разі використання як осердя звичайного двохобвиткового трансформатора дає змогу відповідно до рекомендацій [10] забезпечити живлення споживача потужністю 1,2 кВт, тобто подібного до розглянутого в [8] магнітопроводу броньової конструкції ШЛ40×80. Обраний магнітопровід з електротехнічної сталі 3413 [11] (питомі втрати за прийнятої магнітної індукції 1,5 Тл дорівнюють 1,13 Вт/кг) має масу 5,6 кг [10]. Кожна секція обвитки АТ поділяється за такої умови на дві однакові підсекції, розміщені на різних стрижнях магнітопроводу. Вважаємо, як і у [8], що всі секції обвитки повністю займають вікно осердя без повітряних проміжків, а коефіцієнт заповнення вікна міддю задаємо 0,35.

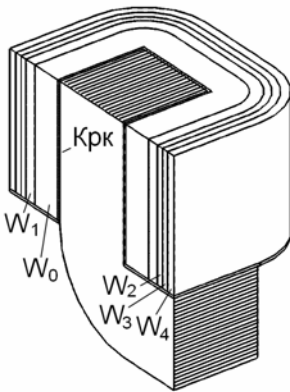


Рис. 2

Для ілюстрації взаємного розташування основних конструктивних елементів автотрансформатора на рис. 2 наведено, виходячи з симетрії АТ у трьох площинах, одну восьму частину об'єкта дослідження, де Крк – каркас котушки, виготовлений з текстоліту товщиною 1 мм. Порядок розміщення секцій половини обвитки, починаючи від стрижня осердя:  $W_0, W_1, W_2, W_3, W_4$ . Кількість витків цих секцій, виходячи з отриманих раніше значень максимальних напруг на них та геометричних параметрів осердя (активна площа перерізу стрижня магнітопроводу згідно з [10] – 18,2 см<sup>2</sup>, розмір вікна – 5 см×10см), становлять відповідно:  $W'_0 = W_0/2 = 172$ ;  $W'_1 = W_1/2 = 22$ ;  $W'_2 = W_2/2 = 12$ ;  $W'_3 = W_3/2 = 13$ ;  $W'_4 = W_4/2 = 28$ .

Обрання припустимої густини струму та максимальних значень струмів у секціях обвитки потребує контролю теплового стану елементів АТ, який визначається втратами енергії в них, зважаючи на те, що за максимально припустимою температурою  $t_{np}$  тут, як і раніше у [8], обрано 81 °С. Виконуючи за цієї умови мультифізичне моделювання двох станів (першого –  $j=1$  та дев'ятого –  $j=9$ ) цього варіанту автотрансформатора (назвемо його варіант А) з допомогою, наприклад, програми Comsol [12], знаходимо максимально припустиме значення густини струму  $j$ , яку обираємо за розрахункову, струми в секціях та втрати енергії в них  $\Delta P_{W_i}$  (Вт) (сумарні в обох котушках) та сумарні втрати в усіх секціях обвитки  $\Delta P_{\Sigma W}$  (Вт), які зведено в таблицю. Також у ній наведено втрати в осерді  $\Delta P_{Fe}$  (Вт), максимальні  $t_{max}$  ( $t_{max} \leq t_{np}$ ) та мінімальні  $t_{min}$  температури (°С) в елементах АТ, масу міді обвитки  $M_{Cu}$  (кг), сталі осердя  $M_{Fe}$  (кг) та максимально припустиме значення потужності споживача  $P_n$  (кВт), що може житися від ТКВС з таким автотрансформатором. (Моделювання проводилося за тих же, що і у [8], спрощень й умов та за тих самих значень теплопровідності осердя ( $\lambda_{оср} = 4$  Вт/(м×К)), обвиток ( $\lambda_{обв} = 2$  Вт/(м×К)) й котушки ( $\lambda_{кту} = 0,2$  Вт/(м×К)) та зна-

чення загального коефіцієнта теплопередачі з поверхні  $\alpha=11,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ , яке еквівалентне сумі коефіцієнта тепловідведення з поверхні об'єкта моделювання за рахунок конвекції  $\alpha_{\text{кв}}=5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$  та випромінювання при степені чорноти поверхні  $\varepsilon=0,8$ .

	АТСК						АТБК						
	А			С			$j_{\text{обв}}$	А		$j$	С		
	$j_{\text{обв}}$	$j=1$	$j=9$	$j_{\text{обв}}$	$j=1$	$j=9$		$j=1$	$j=9$		$j=1$	$j=9$	
$\Delta P_{W_0}$	2,39	19,92	12,32	1,99	17,56	10,86	1,70	10,65	6,59	1,42	9,66	5,97	
$\Delta P_{W_1}$	2,39	11,25	0,51	2,45	12,39	0,56	1,70	6,01	0,27	1,77	6,99	0,32	
$\Delta P_{W_2}$	2,39	6,56	4,06	2,45	7,20	4,45	1,70	3,72	2,30	1,77	4,31	2,66	
$\Delta P_{W_3}$	2,39	7,65	4,73	2,45	8,37	5,18	1,70	4,24	2,62	1,77	4,88	3,02	
$\Delta P_{W_4}$	2,39	0	12,29	4,31	0	23,00	1,70	0	7,05	3,39	0	15,03	
$\Delta P_{\Sigma W}$		45,38	33,91		45,52	44,06		24,63	18,85		25,84	27,01	
$\Delta P_{Fe}$		6,46	7,28		6,46	7,28		8,69	9,80		8,69	9,80	
$\Delta \Sigma P$		51,83	41,19		51,97	51,34		33,32	28,65		34,53	36,81	
$t_{\text{max}}$		81,0	75,5		81,0	81,0		81,0	75,4		81,0	81,0	
$t_{\text{min}}$		69,3	66,1		69,5	69,9		70,2	67,6		71,5	73,6	
$\Delta t_{\text{max}}$		11,7	9,4		11,5	11,1		10,8	7,8		9,5	7,4	
$P_n$		3,65			3,74			3,39			3,54		
$M_{Cu}$		8,07 (58%)							4,41 (37%)				
$M_{Fe}$		5,8 (42%)							7,54 (63%)				
$P_n/M_{\Sigma}$		0,263			0,284			0,284			0,284		

Дані, наведені в таблиці, підтверджують, що за умов однакової густини струму в секціях обвитки ( $j_{\text{обв}}=2,4 \text{ А}/\text{мм}^2$ ) сумарне струмове навантаження та внаслідок цього сумарні втрати енергії в міді обвитки в дев'ятому стані ( $j=9$ ), коли секціями  $W_4$  тече певний струм, суттєво менші, ніж у визначальному для розрахунку АТ першому стані ( $j=1$ ), хоча в ньому секція  $W_4$  знеструмлена, і втрати в ній відсутні. Найбільший внесок у втрати в міді припадає за таких умов на базову секцію  $W_0$  (~44 %). Зменшення втрат енергії в цій секції шляхом зменшення густини струму в ній (тобто збільшення її площі у вікні осердя) дасть змогу підвищити ефективність використання встановленої потужності АТ. Цього, за фіксованого значення  $t_{\text{нр}}=81 \text{ }^\circ\text{C}$ , можна досягти лише в разі відповідного збільшення густини струму в незадіяній четвертій секції  $W_4$  (зменшення її площі у вікні осердя). Проте ця секція задіяна при роботі ТКВС у 9-му стані, який є другим за сумарним струмовим навантаженням обвитки (див. таблицю). Тут найбільший "внесок" у втрати здійснює саме  $W_4$ . Таким чином, струмове "розвантаження" першого (визначального для розрахунку АТ) стану веде до струмового "підвантаження" дев'ятого стану, тобто за вибіркового варіювання густини струму окремих секцій необхідно порівнювати зміну ситуації в цих двох станах. Проведене зменшення густини струму в секції  $W_0$  до  $1,94 \text{ А}/\text{мм}^2$  та її збільшення до  $4,21 \text{ А}/\text{мм}^2$  в секції  $W_4$  дало змогу отримати деякий проміжний варіант ТКВС, у якому найвища температура в елементах АТ зрівнялася в обох станах – знизилася в першому та зросла в дев'ятому до  $79,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , що менше за  $t_{\text{нр}}$  (дані для цього варіанту в таблиці не наведено). Останнє дозволяє додатково одночасно підвищити густину струму в усіх секціях обвитки приблизно на 2,4 %, при якому в елементах АТ буде досягнуто обрану за максимальну температуру  $81 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отриманий таким чином варіант ТКВС позначено в таблиці літерою С. Порівняння варіантів А та С свідчить про доцільність виконаної процедури – припустиме максимальне значення вихідної потужності зросло з 3,65 до 3,74 кВт.

У АТ з осердям стрижневої конструкції (АТСК), як і у АТ з осердям броньової конструкції (АТБК), можна шляхом перерозподілу втрат у секціях обвитки досягти певного підвищення ефективності використання його встановленої потужності, хоча воно буде дещо меншим (~2,5 %), ніж у АТБК (~4,4 %). Зауважимо, що рівень підвищення цього показника за вибіркового варіювання густини струму в окремих секціях обвитки АТ суттєво залежить

від обраної конфігурації ТКВС, яка визначається різними факторами, зокрема діапазоном зміни вхідної напруги, у межах якого реалізується стабілізація вихідної напруги. Дещо менша й питома потужність АТ – 0,269 Вт/кГ проти 0,296 Вт/кГ. Також слід відзначити й суттєво вищі втрати енергії в елементах АТ за рахунок збільшення втрат у міді обвитки. Отже, під час вибору доцільної конфігурації магнітопроводу АТ у ТКВС стабілізатора напруги пріоритетами можуть стати інші вимоги, наприклад, зменшення загальної маси АТ, зменшення витрат міді тощо.

Таким чином, у роботі проаналізовано можливості підвищення ефективності використання встановленої потужності секціонованого автотрансформатора шляхом цілеспрямованого перерозподілу втрат у елементах АТ з магнітопроводом стрижневої конструкції в складі виконавчої структури стабілізатора напруги. Виконано порівняльну оцінку з результатами, отриманими для АТ з магнітопроводом броньової конструкції.

*Стаття підготовлена при виконанні НДР "Рестан" ("Розвиток та узагальнення теорії трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) перетворювачів напруги з урахуванням багатоваріантності схематехнічних рішень та мультифізичності процесів"), державний реєстраційний номер 0115U002579.*

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наукова думка, 1983. 216 с.
2. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *4<sup>th</sup> International Conf. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. IEEE*, 6–9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
3. Gehm A. A., Quevedo J. D. O., Mallmann E. A., Fricke L. A., Martins, M. L. D. S. & Beltrame R. C. Development of a supervisory system for an intelligent transformer. *In Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015 IEEE 13th Brazilian*. Pp. 1–6. IEEE. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420242>
4. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
5. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. No 4. Pp. 11–20.
6. Strzelecki R., Matelski W., Małkowski R., Tomasov V., Wolski L. & Krahel A., Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application, *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. IEEE*, 17–19 April 2019, Kyiv, Ukraine. Pp. 132–137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764193>
7. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Визначення впливу зміни меж діапазону вхідної напруги на потужність трансформуючого елемента стабілізатора напруги з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 46–54.
8. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Вплив розподілу втрат енергії в елементах автотрансформатора трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізатора напруги на ефективність використання його встановленої потужності. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 53. С. 60–64.
9. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Моделювання трансформуючих елементів з секціонуванням обвиток у складі перетворювачів напруги змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 39–44.
10. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Москва: Энергия, 1973. 400 с.
11. ГОСТ 27427.1-83 Сталь электротехническая тонколистовая. (дата звернення 15.08.2019).
12. COMSOL Multiphysics – <http://www.comsol.com>. (дата звернення 15.08.2019).

УДК 621.314

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА СО СТЕРЖНЕВЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ В СОСТАВЕ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СТАБИЛИЗАТОРА НАПЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**К.А. Липковский**, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

*Автотрансформатор (АТ) трансформаторно-ключевой исполнительный структуры (ТКВС) стабилизатора напряжения переменного тока в значительной степени определяет массогабаритные показатели преобразователя в целом. Одним из методов повышения эффективности использования установленной мощности АТ является целенаправленное перераспределение потерь в элементах АТ, которое позволяет уменьшить нерав-*



номерность их нагрева, увеличить плотность тока в его обмотках и вследствие этого увеличить ток нагрузки и его допустимую мощность. В работе прослежены особенности этой процедуры и ее последствия для ТКВС с автотрансформатором, который имеет магнитопровод стержневой конструкции, возможный выбор которой является одним из ряда проявлений многовариантности построения трансформаторно-ключевой исполнительной структуры. Библ. 12, рис. 2, таблица.

**Ключевые слова:** трансформаторно-ключевая исполнительная структура, discrete smart transformer, преобразователь напряжения переменного тока, секционированная обмотка, варьирование плотности тока, тепловое состояние.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF USING AN AUTOTRANSFORMER WITH A CORE OF MAGNETIC CIRCUIT AS A PART OF THE TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE OF AN AC VOLTAGE STABILIZER

**K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 036890, Ukraine

*The autotransformer (AT) of the transformer-and-switches executive structure (TSES) of an AC voltage stabilizer largely determines the overall dimensions of the converter. One of the methods to increase the efficiency of using the installed power of the AT is the targeted redistribution of losses in the elements of the AT, which can reduce the unevenness of their heating, increase the current density in its windings and, as a result, increase the load current and its allowable power. The paper traces the features of this procedure and its consequences for a TSES with an autotransformer which has a core magnetic circuit, the possible choice of which is one of a number of manifestations of the multivariance of the construction of a transformer-and-switches executive structure.* References 12, figures 2, table.

**Key words:** transformer-and-switches executive structure, discrete smart transformer, AC voltage converter, partitioned winding, variation of current density, thermal processes.

1. Lypkivskiy K.A. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus)
2. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *4<sup>th</sup> International Conf. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. IEEE*, 6–9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
3. Gehm A. A., Quevedo, J. D. O., Mallmann E. A., Fricke L. A., Martins M. L. D. S. & Beltrame R. C. (2015, November). Development of a supervisory system for an intelligent transformer. *In Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference., 2015 IEEE 13th Brazilian*. Pp. 1–6. IEEE DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420242>
4. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
5. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. No 4. Pp. 11–20.
6. Strzelecki R., Matelski W., Małkowski R., Tomasov V., Wolski L. & Krahel A., Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application, *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. IEEE, 17–19 April 2019, Kyiv, Ukraine. Pp. 132–137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764193>
7. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Determination of the influence of changes in the limits of the input voltage range on the power of a transformer element of a voltage stabilizer with a transformer-and-switches executive structure. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2019. No 3. Pp. 46–54. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.046>
8. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Influence of distribution of energy losses in the elements of the autotransformer of the transformer-and-switches executive structure of the voltage stabilizer on the efficiency of using its installed power. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2019. No 53. Pp. 60–64. (Ukr)
9. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Simulation of the transformative elements with sectioning of the windings as part of AC voltage source converters. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 39–44. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.039>
10. Belopolskiy I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. Calculation of low-power transformers and reactors. Moskva: Energiya, 1973. 400 p. (Rus)
11. GOST 27427.1-83 Rolled Electrical Steel. (Rus) (accessed 15.08.2019).
12. COMSOL Multiphysics – <http://www.comsol.com>. (accessed 15.08.2019).

Надійшла: 05.09.2019

Received: 05.09.2019